宇宙航空の最新情報マガジン

国立研究開発法人
宇宙航空研究開発機構
機関誌
［ジャクサス］
No.076
April 2019

「はやぶさ2」タッチダウン成功

宇宙航空の最新情報マガジン

CONTENTS

[ジャクサス] 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構機関誌

No.076 April 2019

Cover Photo:2019年2月22日7時48分(地上、日本時間)、「はやぶさ2」は小惑星リュウグウの着地予定地点に無事着地しました。カバー画像は、タッチダウン後の上昇中に広角の光学航法カメラ(ONC-W1)で撮影したものに、着陸予定地点(紫色の円)と投下したターゲットマーカの位置を示す赤い矢印(矢印の先の白い点がマーカ)を合成したものです。リュウグウの地表に「はやぶさ2」のシルエットがきれいに映っています。「はやぶさ2」タッチダウンの詳細は今号P3-5をご覧ください。(画像クレジット:JAXA、東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工大、明治大、会津大、産総研)

3 「はやぶさ2」小惑星リュウグウへのピンポイントタッチダウン成功!
吉川 真 宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系 准教授「はやぶさ2」プロジェクトチーム ミッションマネージャ

4 ドキュメント「はやぶさ2」
リュウグウへのタッチダウンはこうして成功した!

6 月周回軌道から月面へ
JAXAが考えている宇宙探査シナリオ
佐々木 宏 国際宇宙探査センター センター長

10 世界が「いぶき2号」を必要としている
地球環境を守るため衛星データを活用する時代がはじまった
大井 通博 環境省 地球環境局 総務課 研究調査室/気候変動適応室 室長

12 チームで挑む小型回収カプセル
～研究開発のたすきをつなぐミッション～
中村 涼 有人宇宙技術部門 HTV技術センター 主任研究開発員
宮崎 和宏 有人宇宙技術部門 HTV技術センター 主任研究開発員
春木 美鈴 研究開発部門 第一研究ユニット 研究開発員
畠中 龍太 研究開発部門 第二研究ユニット 研究開発員

15 福井県の高校生たちが開発
宇宙日本食「サバ醤油味付け缶詰」がJAXAの認証を得るまでの12年

16 産官学の異分野連携で航空機の電動化を目指す
航空機電動化(ECLAIR)コンソーシアム
西沢 啓 航空技術部門 次世代航空イノベーションハブ ハブマネージャ(エミッションフリー航空機技術チーム長)

18 [研究開発の現場から]
再使用ロケットが切り拓く宇宙利用拡大
再使用型宇宙輸送システムの研究
[小型実験機RV-Xと1段再使用飛行実験(CALLISTO)]
野中 聡 宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究系 准教授
紙田 徹 研究開発部門 第四研究ユニット 研究領域主幹 主幹研究開発員
石本 真二 研究開発部門 1段再使用飛行実験(CALLISTO)プリプロジェクトチーム チーム長
齋藤 靖博 研究開発部門 1段再使用飛行実験(CALLISTO)プリプロジェクトチーム 副チーム長

20 [JAXAトピックス]
1. 「HTV搭載小型回収カプセルの開発」が日本産業技術大賞文部科学大臣賞受賞
2. イプシロンロケット4号機による革新的衛星技術実証1号機の打ち上げ成功!

「2019年2月22日、人類の手が新しい小さな星に届きました。」
「はやぶさ2」プロジェクトマネージャが発したこの言葉は、とても爽やかにJAXA相模原キャンパスの記者会見場に響き渡りました。その後の報道、SNS、JAXAへの直接のお便り等々を通じ、私たちは世界中の人々とその成功の喜びを分かち合えたことを実感しています。多くの皆様のご協力・ご声援ありがとうございました。

(広報部長 鈴木明子)

発行責任者
JAXA
(国立研究開発法人
宇宙航空研究開発機構)
広報部長 鈴木 明子

JAXA's 編集委員会
委員長 鈴木 明子
委員 青山 剛史
寺門 和夫
山根 一眞
山村 一誠
アドバイザー 的川 泰宣

編集制作
株式会社ビー・シー・シー
2019年4月1日発行

2019年2月22日8時9分。リュウグウへのタッチダウン後、「はやぶさ2」の状態が正常であることが確認され、拍手が沸き起こる管制室。

①タッチダウンの成功を確認し、祈願のダルマに目をいれる津田プロジェクトマネージャ。②タッチダウン後「はやぶさ2」からのテレメトリ受信の画面を見つめる國中理事。③「はやぶさ2」が降下から上昇へ転じたことが確認され、タッチダウン成功を喜び合う津田プロジェクトマネージャと佐伯プロジェクトエンジニア。④タッチダウンの瞬間を見守る初代はやぶさプロジェクトマネージャ川口教授。

「はやぶさ2」小惑星リュウグウへのピンポイントタッチダウン成功!

文:吉川 真(よしかわ まこと)
宇宙科学研究所
宇宙機応用工学研究系准教授
「はやぶさ2」プロジェクトチーム ミッションマネージャ

2019年2月22日、午前7時48分、JAXA宇宙科学研究所の管制室は緊張状態から拍手へと変わりました。「はやぶさ2」が、下降から上昇に転じたことが分かった瞬間です。その後、8時9分には探査機からのテレメトリも受信できて、探査機状態が正常であることに加えて、プロジェクタイルを発射するシーケンスが正常に終了していることも確認されました。ここで再び管制室では拍手が起こりました。タッチダウンが成功したのです。

「はやぶさ2」は2018年6月27日に小惑星リュウグウに到着して以来、リュウグウを詳しく観測し、小型ローバのMINERVA-II1(AとBの2機)や小型着陸機のMASCOTをリュウグウ表面に降ろすことに成功しました。しかし、最重要の運用であるタッチダウンについては、2018年10月から2019年2月に延期して行うことにしました。その理由は、リュウグウ表面が大小無数と言ってよいほどの岩塊で覆われており、平らな部分がほとんど無かったためです。最終的には10月の運用で降ろしたターゲットマーカの近くの幅6メートルほどの場所にタッチダウンすることになりました。これは探査機の大きさとほぼ同じ大きさです。

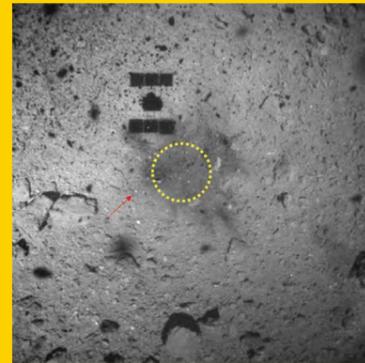
そのタッチダウンは上記のように成功し、プロジェクトメンバー一同ほっとしたわけですが、さらに驚くべきことが続きました。それは、タッチダウンをしたところの写真を見ると、そこが変色して見えていたのです。これはタッチダウンによって舞い上がった砂礫のためだろうとすぐに予想されましたが、ただ変色域が広すぎるような感じもしました。この疑問は、続けてダウンリンクされた小型モニタカメラ(CAM-H)の画像で解決しました。CAM-Hの画像ではタッチダウンの直後に多数の小石(砂礫)が小惑星上空高くまで舞い上がっていたのです。この映像は、惑星探査史を塗りかえるのではないかと思わせるほど、感動的なものでした。

次の大きな運用は衝突装置を使った人工クレーターの生成実験、そして2回目のタッチダウンになります。さらには、最後に1機残っている小型ローバMINERVA-II2の分離もあります。そして2019年末にはリュウグウから出発して、2020年末の地球帰還を目指します。

*時刻はすべて地上での日本時間です。

小型モニタカメラ(CAM-H)による撮影。(左上)タッチダウン直前の2月22日、7時45分(地上、日本時間)に高度約8.5mから撮影された画像。(左下)タッチダウン直後の7時48分に高度約8.0mから撮影された画像。

©JAXA

タッチダウン直後にタッチダウン地点付近を撮影した画像。広角の光学航法カメラ(ONC-W1)によって、2019年2月22日7時49分頃(地上、日本時間)に撮影された。探査機の高度は25m前後。円は、タッチダウン予定地点を示す。矢印の先の白い点がターゲットマーカである。(画像クレジット:JAXA、東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工大、明治大、会津大、産総研)

タッチダウン地点。おおよその位置は、図の赤い四角(■)のところである。

©JAXA

タッチダウンの成功を記念して、「はやぶさ2」プロジェクト関係者全員が集合して記念写真が撮影された。

ドキュメント「はやぶさ2」リュウグウへのタッチダウンはこうして成功した!

(時刻はすべて地上での日本時間です。「はやぶさ2」から地球に電波が届くには19分かかるので、以下のすべての事象は、「はやぶさ2」機上では19分前に起こっています)

©JAXA

2月20日

07:00

「はやぶさ2」のタッチダウン運用が始まった。「はやぶさ2」が目指すのは、L08-E1領域の半径3mの円内へのピンポイントタッチダウンである。ピンポイントタッチダウンとは、すでに投下したターゲットマーカの位置をもとにして探査機の位置を制御し、高精度なタッチダウンを行う手法である。タッチダウン場所のすぐ近くには、昨年10月に行ったTD1-R3(タッチダウンのための3回目のリハーサル)で落としたターゲットマーカ、TM-Bがある。

この日はタッチダウンに必要なプログラムの伝送などの準備が行われた。リュウグウへの降下開始は翌21日の08時13分の予定であった。

2月21日

07:15

Gate1チェックが開始された。タッチダウン運用では、運用の途中に判断ポイント(Gate)が設定されている。Gate1ではリュウグウへの降下開始の可否判断を行う。「はやぶさ2」の降下準備プログラムを動作させたところ、探査機が認識している位置情報が想定と異なっていた。このため、降下開始の可否判断を遅らせ、状況確認が行われた。探査機は正常で、降下誘導プログラムのいくつかの動作タイミングを調整することで、降下を問題なく行えることがわかった。この作業に約5時間を要した。

13:32

「はやぶさ2」にコマンドが送られた。「はやぶさ2」がこのコマンドを受信したのは19分後。いよいよ高度20kmのホームポジションからの降下が始まった。当初の降下開始時刻から5時間遅れていた。タッチダウン時刻は決められているため、この遅れを取り戻さなくてはならなかった。「はやぶさ2」は秒速40cmで降下する予定であったが、秒速90cmで降下することになった。「はやぶさ2」チームは秒速1mで降下する訓練を行っていたので、この速度での降下も問題はなかった。

17:52

「はやぶさ2」は当初予定されていた軌道に復帰した。高度は約6kmであった。

18:52

Gate 2での降下継続の可否確認開始。降下継続の判断が下された。

2月22日

06:02

Gate3での最終降下判断(GO/NOGO判断)開始。この時点で「はやぶさ2」はリュウグウ表面から500mの高度まで降下しており、ここでのデータを地球に送ってきた。「はやぶさ2」チームは送られてきたデータから、探査機が目標に到達できるかどうかの判断を行った。高度500m以下は、「はやぶさ2」が搭載コンピュータに基づき自律降下・タッチダウンを行う。地上からのコマンドが「はやぶさ2」に届くまで19分かかるため、ここから先は、地上からの指令で探査機を誘導することは基本的にできない。

06:31

「はやぶさ2」は目標に到達できると判断され、GOコマンドが送られた。「はやぶさ2」にGOコマンドが届いた時には、探査機は高度140mまで降下していた。

07:26

「はやぶさ2」との通信がHGA(高利得アンテナ)からLGA(低利得アンテナ)に切り替えられた。この時点で、探査機からのテレメトリデータは送られなくなるので、地上では探査機の状態が分からなくなる。ここから先は、低利得アンテナからの一定の周波数の電波を受信し、そのドップラー効果から「はやぶさ2」の速度をモニターするだけになった。この時点で「はやぶさ2」はリュウグウから高度45mでホバリングの状態に入っていた。

07:29

「はやぶさ2」は自律降下中に、19分前に発信された地上のオペレータによるGCP-NAV誘導の最後の微調整コマンドを受信し、位置の微調整を行いながら、ターゲットマーカを捕捉した。ターゲットマーカを追尾しながら、「はやぶさ2」は降下を始めた。「はやぶさ2」は降下の間、常に自己監視をしており、異常が起こったと判断すると、すぐにアボート(緊急上昇)することになっていた。

07:35

「はやぶさ2」はここまでLIDAR(レーザ高度計)を使ってリュウグウからの高度を計測していたが、LRF(レーザ・レンジ・ファインダ)が高度計測を引き継いだ。

07:38

「はやぶさ2」はターゲットマーカの真上、高度8.5mまで降下し、ホバリングを開始。着陸のために姿勢を傾ける態勢に入った。着陸地点には少し傾斜がある。そのため、「はやぶさ2」は傾斜にあわせて姿勢を傾けてからタッチダウンする必要があった。ただし、傾斜に完全にならうのではなく、イオンエンジンのある機体後部が岩塊に接触しないように、後部を少し持ち上げるという非常に微妙な姿勢を要求された。「はやぶさ2」は姿勢を傾けるとともに、ターゲットマーカを視野に入れながら着陸目標方向に水平移動した。

07:46

着陸姿勢が安定し、「はやぶさ2」は最終降下に入った。

07:48

タッチダウン! これは低利得アンテナのドップラーデータが降下から上昇に転じたことで確認された。のちのデータ解析により、「はやぶさ2」は目標としていた半径3mの円の中心からわずか1m離れた場所にタッチダウンしたことが明らかになった。

08:09

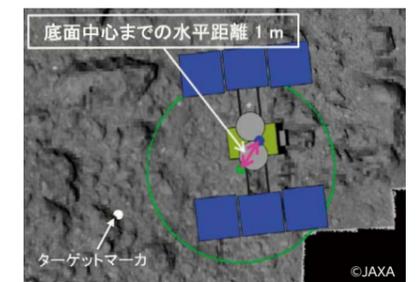
「はやぶさ2」との通信がLGA(低利得アンテナ)からHGA(高利得アンテナ)に切り替えられ、探査機からのテレメトリデータを受信できるようになった。探査機の状態が正常であることが確認された。その後、送られてきたテレメトリデータを確認したところ、弾丸発射装置付近の温度が上昇したこと、および上昇中の画像データから、弾丸が発射されたことが確認された。

11:39

リュウグウのサンプルが入っていると考えられるキャッチャA室が閉鎖された。

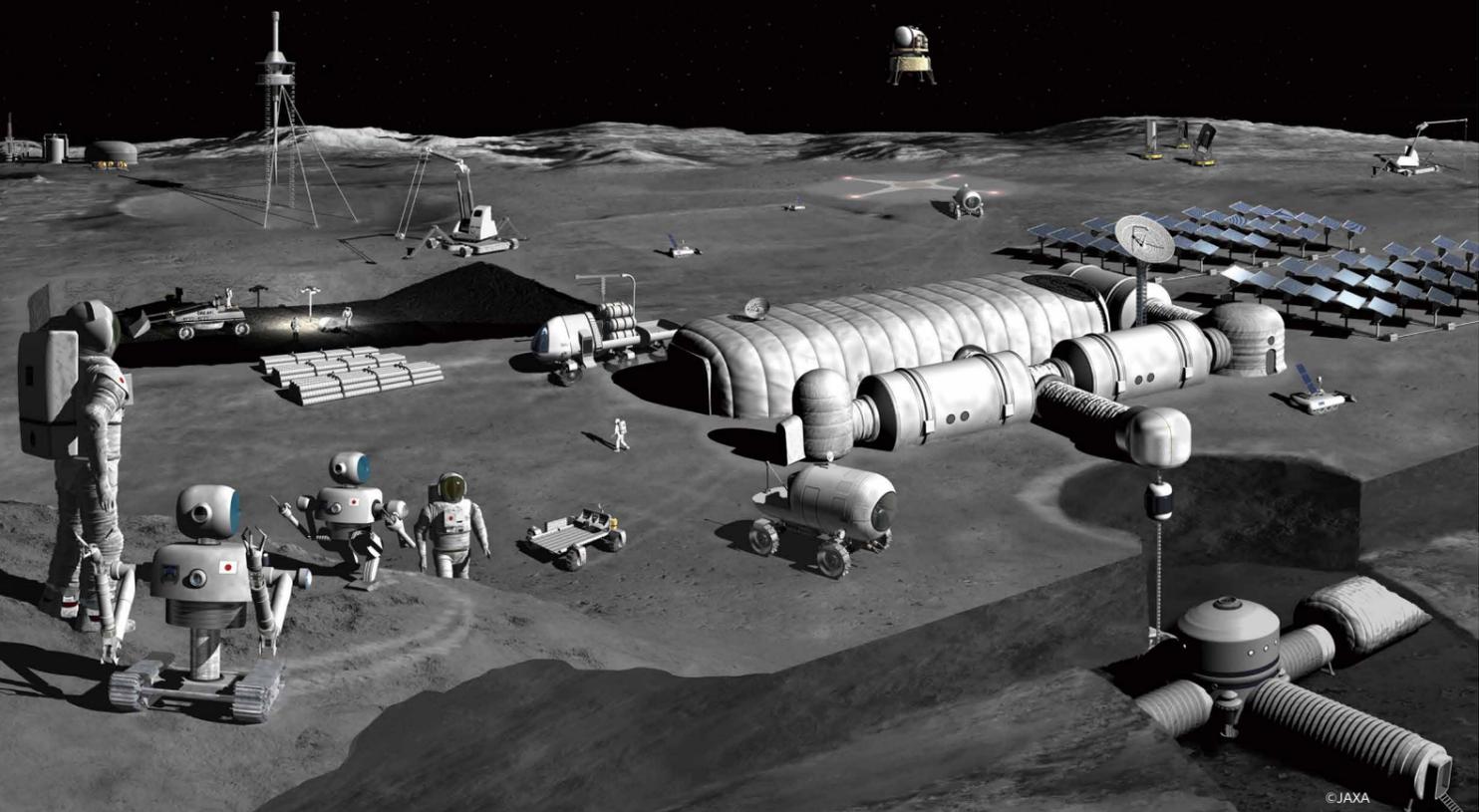
2月23日

12:19

「はやぶさ2」はホームポジションに戻った。

緑の円内がタッチダウン予定場所で、その中心が着地の目標地点であった。実際に着地した「はやぶさ2」の中心(青い点)と、目標地点からのずれは1mであった。(背景は形状モデル)

©JAXA

JAXAが考えている宇宙探査シナリオ

月周回軌道から月面へ

佐々木 宏（さささき ひろし）
国際宇宙探査センター センター長

NASAが提唱していた月周回軌道の有人拠点「ゲートウェイ」構想が正式にスタートし、国際宇宙探査活動が動き始めました。JAXAは今後どのような月探査を行い、どのような技術で月面での活動を実現しようとしているのか。JAXAが考えている月面へのシナリオを国際宇宙探査センターの佐々木宏センター長に聞きました。

取材・文:寺門 和夫(科学ジャーナリスト)

月を周回する有人拠点建設へ

──「はやぶさ2」が小惑星リュウグウへのタッチダウンに成功しました。JAXAが進めている太陽系探査の歴史的な成果の一つといえます。JAXAはさまざまな探査活動を行っていますが、国際宇宙探査センターの役割とは何でしょうか。

佐々木　国際宇宙探査センターは2018年7月に発足しました。JAXAには有人宇宙技術部門の国際宇宙ステーション(ISS)での活動や、「はやぶさ2」のような宇宙科学研究所のミッション、宇宙探査イノベーションハブでの活動などがあり、さらに研究開発部門でもさまざまな研究を進めています。国際探査センターはこれらの活動の整合を図り、これからのべる月・火星を中心とした国際宇宙探査をオールJAXAで進めることを担う組織です。

──2018年3月に東京で開催された第2回国際宇宙探査フォーラム(ISEF2)で、国際宇宙探査を平和目的と人類への利益のために国際的な協力で行うことが確認されました。その後、どのような動きがありますか。

佐々木　NASAが提唱していた月周回軌道の有人拠点「ゲートウェイ(Gateway)」建設の予算が先日成立して、正式に米国ではGOがかかりました。第1回目のプログラム会合が、参加を計画しているJAXA、ESA、カナダ、ロシアも出席して開かれたところです。ゲートウェイは月面有人探査の拠点となるほか、深宇宙環境を利用した科学の場となります。また、火星有人探査のための技術実証の場にもなります。

──ISS計画のパートナーが集まった形ですね。

佐々木　そうですね。ゲートウェイはいろいろな国が利用することになりますが、コアとなるモジュールを作るのはISS計画の参加国で行うことになっています。

JAXAが得意な技術で ゲートウェイ計画に参加

──ゲートウェイとは、どのような施設なのでしょうか。

佐々木　ゲートウェイは各モジュールがくし刺しのようにつながっていく構成になっています。電力推進エレメント、ヨーロッパの補助モジュール(ESPRIT)、NASAのユーティリティ・モジュール、国際居住モジュール、NASAの居住モジュール、そしてロシアの多目的モジュール(MPM)です。質量は約70tで、ISSの6分の1から7分の1の規模です。国際居住モジュールはヨーロッパとJAXAが担当します。ヨーロッパがモジュールを組み立て、JAXAはそこで使われるECLSS(生命維持・環境抑制制御)システムを提供する予定です。カナダはロボットアームを担当します。ゲートウェイへの物資補給はNASAとJAXAが行います。

──JAXAの生命維持・環境抑制制御の技術が国際的に認められたわけですね。

佐々木　そうですね。この技術はゲートウェイに限らず、月面でも使える根幹の技術です。また物資補給はJAXAが現在開発中のHTV-Xを使用します。JAXAとしては生命維持と物資補給という二つの重要な技術を担うことを考えています。

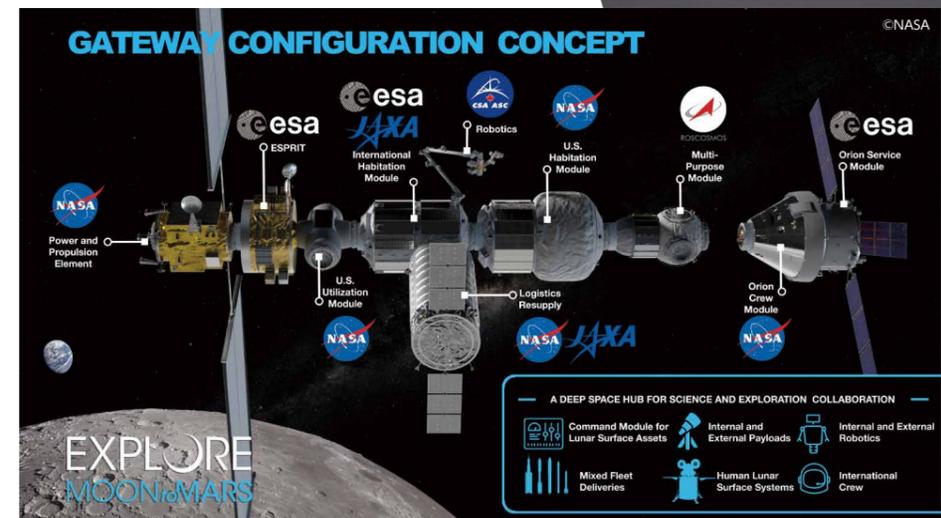
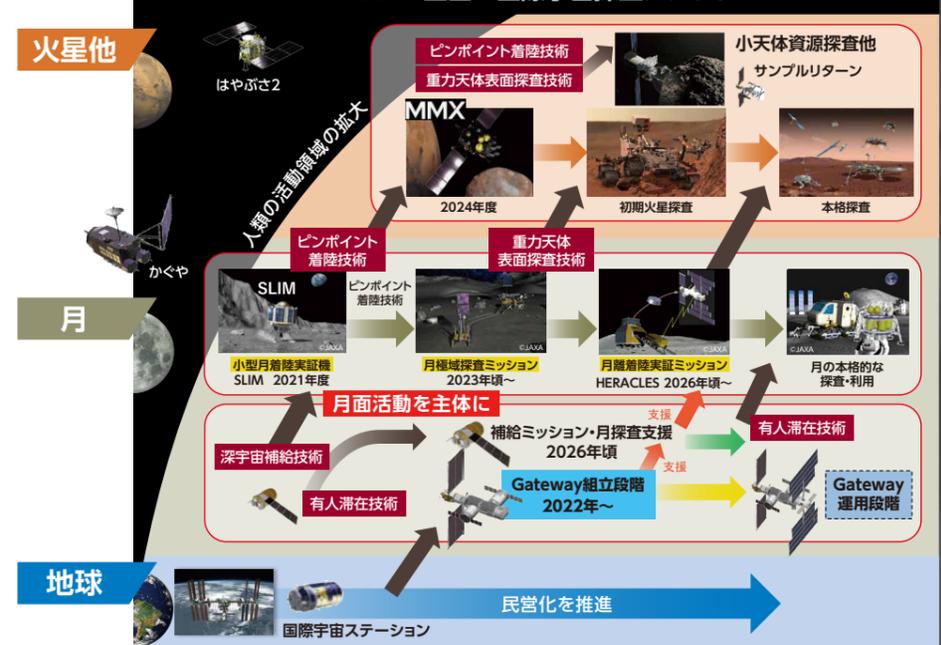
──ゲートウェイ組み立てのスケジュールはどうなっていますか。

佐々木　2022年に電気推進エレメントが打ち上げられます。その後2026年まで、だいたい年1回の有人ミッションでゲートウェイを組み立てていきます。この期間が組み立てフェーズになります。組み立てフェーズでの宇宙飛行士の滞在期間は長くて1カ月くらいです。ISSのように宇宙飛行士がずっと滞在しているわけではありません。

──日本がゲートウェイに参加する意義はどういうことでしょうか。

佐々木　まず、これが月面への足がかりに

月を周回する軌道に建設されるゲートウェイ

©NASA

ゲートウェイの構成。左から4番目が国際居住モジュールで、ヨーロッパとJAXAが担当する。国際居住モジュールの手前にはJAXAのHTV-Xを使用した補給船がドッキングしている。

なるということです。JAXAだけで直接月に降りて、また帰ってくることや、中継拠点となる月周回モジュールを独自に持つことは財政的にも無理です。それを国際協力の中で実現できるのが一番のポイントだと思います。もう一つは、ゲートウェイという地球の引力圏を離脱した有人拠点活動に参加することで、ISS計画で培った有人の技術を発展させていくことができることです。こうした観点から、JAXAではゲートウェイを拠点に、さらに有人月面離着陸機、有人月面拠点、月面与圧ローバなど月面で活動するための技術開発をしていきたいと考えています。

──日本人宇宙飛行士が月面に立つことも可能になるでしょうか。

佐々木　そうですね。2020年代にゲートウェイに日本人宇宙飛行士を送りこみ、2030年代の早い時期に月面に日本人宇宙飛行士を送ることを目標にしています。

目標へのピンポイント着陸を目指すSLIM

──そのような将来を実現するための、月面活動を主体とした当面の国際宇宙探査シナリオについてうかがいます。

佐々木　まずは月面に降りる。次には降りて、まわりを移動する。そして、月面のサンプルを採取して持って帰るという流れでのシナリオを考えています。最初に、小型月着陸実証機(SLIM)で月面にピンポイント着陸する技術を実証することになります。

──「はやぶさ2」もそうでしたけれども、やはり行きたい所に行くためには、ピンポイント着陸が必要ですね。

佐々木　そうですね。SLIMが着陸を目指しているのは、「神酒の海」にある月のマントル物質が露出していると考えられる場所です。月の起源や進化の解明に寄与できると考えられます。JAXAの月周回衛星「かぐや」の観測で分かった場所です。

──「かぐや」で調べて、科学的に面白い場所にピンポイント着陸で降りるわけですね。「かぐや」は大成功した月探査ミッションでした。

佐々木　アポロ計画以後、月の探査はしつくしたという雰囲気があったのですが、「かぐや」とNASAのLROが月を周りながら、しっかりリモートセンシングをして、新たな科学的な興味を引き出したのは大きいですね。水の存在の可能性が分かってきたのも、これらのリモートセンシングの成果です。

月の南極域で水を探す

──SLIMでピンポイント着陸技術を実証し、次の段階として、現在JAXAは月の南極域に降りる探査を検討していますね。

佐々木　これはインドとの共同ミッションで、着陸機はインドが担当し、JAXAは月面を移動するローバを担当します。月面での活動は降りるだけではだめで、移動できなくてはなりません。私たちはローバの開発は非常に大事だと思っています。質量何百kgというものをしっかりと月面で動かせないと、将来月面に基地を作ろうとしても、何もできないことになります。

──ローバの技術で難しい点は何ですか。

佐々木　レゴリスと呼ばれる月の細かい砂の上で移動する技術、それから越夜技術ですね。2週間続く月の夜の環境は温度がマイナス170℃にもなり、非常に厳しい。電源の問題もあるし、熱制御系の問題もあります。難易度の高い技術が必要になります。

──極域を探査する目的ですが、一つには水(氷)の存在を調べるということがありますね。

佐々木　水が存在すれば、将来、それを電気分解して水素と酸素を作り、月から飛び立つ宇宙船の推進剤に使うことができますし、月面での生命維持にも使えます。宇宙機関として月の探査活動を進めるに当たっては非常に重要な材料になりますので、水を探しにいくというのは大事だと思います。

写真左:月へのピンポイント着陸を目指す小型月着陸実証機SLIM。2021年に打ち上げの予定。
写真右:JAXAが検討している月極域探査。月の南極域に着陸し、ローバで移動しながら水(氷)の調査などを行う。インドとの共同で行い、日本はローバを、インドは着陸機を担当する。

有人月着陸を見すえた着陸機をJAXAが担当

──極域探査の次のステップとして検討されているのがHERACLESですね。

佐々木　HERACLESは月面からのサンプルリターンを目指します。着陸機をJAXA、月面を移動するローバをカナダが、そして月面からゲートウェイに戻るための離陸機をESAが担当します。

──HERACLESは現在の構想では全質量が8.5tあります。非常に大きな探査機ですね。

佐々木　HERACLESは有人月面探査技術の実証という位置づけなのです。有人の月着陸、月面移動、ゲートウェイとのランデブーなどの技術を実証することが目的になっています。JAXAも有人の着陸機を意識して開発をすることになります。

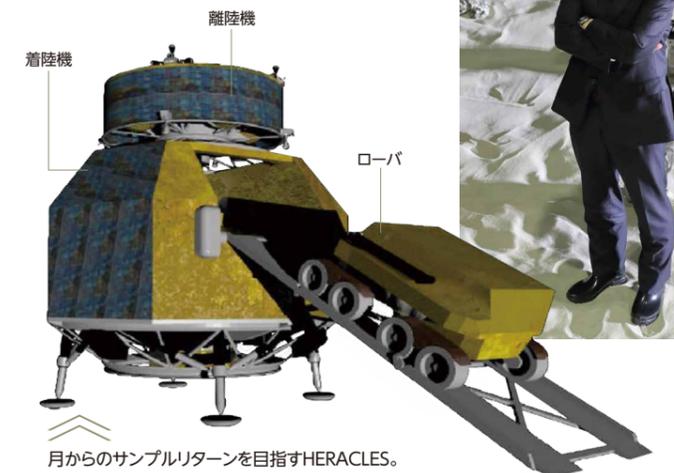
──ここまでうかがったお話は、主に技術的なものでした。これらの探査構想について、どのような科学的価値があるか検討されているのでしょうか。

佐々木　私たちは科学コミュニティとの連携を非常に大事だと考えています。JAXAの宇宙科学研究所と他の大学や研究機関の専門家、研究者も参加する宇宙工学委員会/宇宙理学委員会の中に、国際宇宙探査専門委員会を設置し、さらにそれぞれのミッションに対応したタスクフォースが作られています。月の極域探査、HERACLES、Gateway、さらには火星ミッションについて、評価や提言をまとめていただいています。

宇宙探査の大海原へ

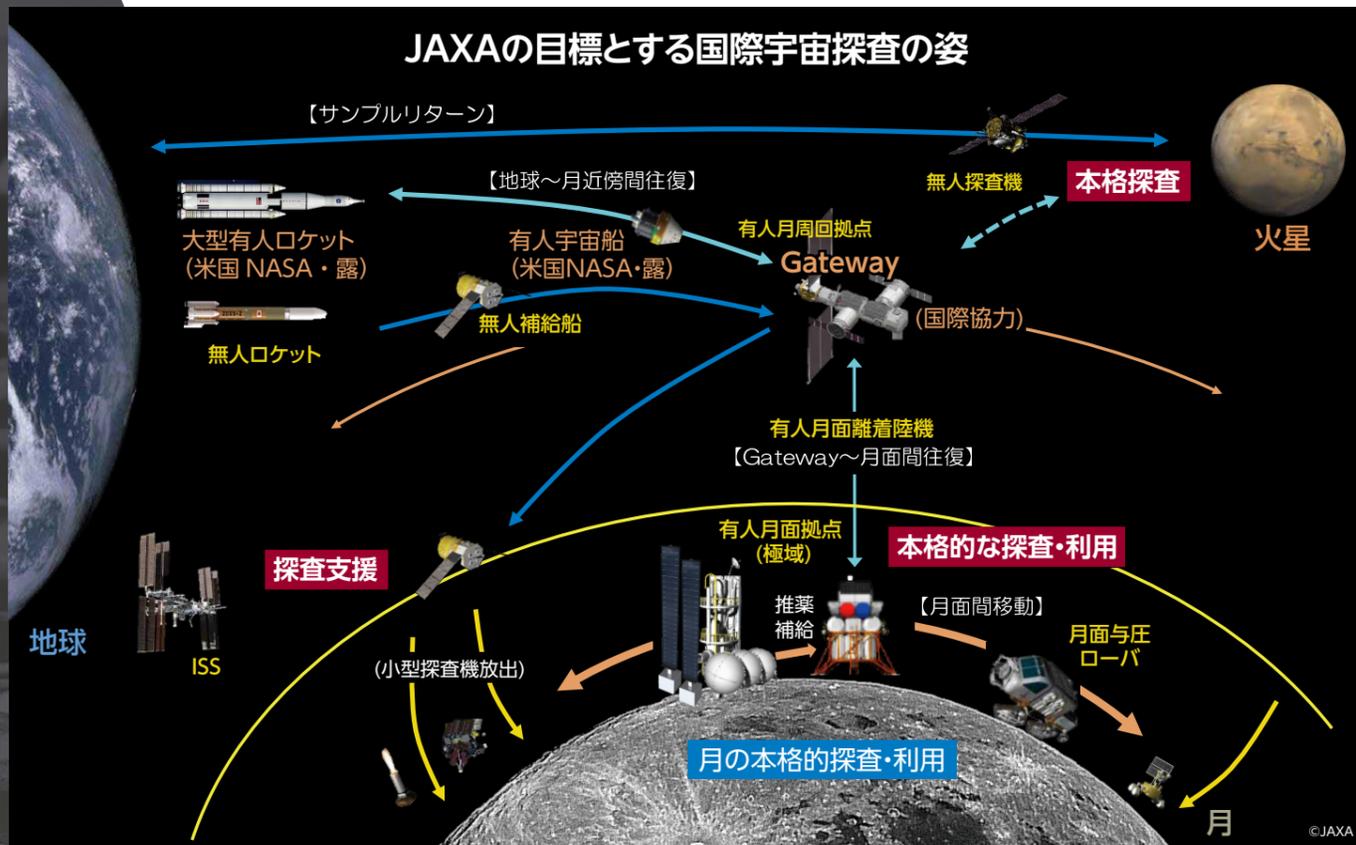
──こうしたシナリオの先に、JAXAとしてはどのような月面での活動を構想しているのでしょうか。

佐々木　2020年代はこれまでのべたような着陸機とかローバなどの技術を実証していく時期だと思います。2030年には、宇宙飛行士が確実に月面に降りて活動できるレベルまで持っていく。2040年代には、人間が常時居住できる拠点を作りたいと思っています。

月や火星を目指す宇宙探査の大きな意義は、人類の活動領域を拡大することと、人類の知的資産創出への貢献にあると、私たちは思っています。さらに、新しい産業や市場を構築することもあります。その上で、国際平和への貢献、国際社会での日本のプレゼンスの確保、日本の革新的な技術の獲得や技術イノベーションへの寄与、教育や人材育成への貢献などの点でも意義のある事業だと考えています。我が国の産業や国民の生活にも直接貢献するもので、国民の皆さんにその意義を理解していただき、この事業を進めていきたいと思っています。

月からのサンプルリターンを目指すHERACLES。JAXAは着陸機を担当。ヨーロッパが離陸機を、カナダがローバを担当する。将来の有人月着陸ミッションの技術実証という目的も持っている。

JAXAとトヨタ、国際宇宙探査ミッションへの挑戦に合意

2019年3月12日。JAXAとトヨタ自動車は国際宇宙探査ミッションでの協業の第一弾として、これまで共同で進めてきた、燃料電池(FC)技術を用いた「有人与圧ローバ」の検討を加速することに合意しました。検討中のこのローバはマイクロバス2台分程度の大きさで、2名の宇宙飛行士が宇宙服なしで滞在でき、自動運転機能と月面を1万km以上走行する能力を目指しています。

提供:トヨタ自動車株式会社

世界が「いぶき2号」を必要としている

地球環境を守るため 衛星データを活用する時代がはじまった

JAXAの地球観測衛星はさまざま地球環境問題の解決に向けて、宇宙からデータをとり続けています。今年1月には、多くの成果をあげた、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」の後継機である「いぶき2号」(GOSAT-2)のデータ運用が始まりました。今年の5月に開催されるIPCC49回総会では、温室効果ガス排出削減に向けての衛星データの活用が議論される予定です。JAXA、NIES(国立環境研究所)と共にGOSATプロジェクトを推進する環境省の大井室長に気候変動に適応していくための世界の状況と衛星データの今後の活用について聞きました。

取材・文:寺門 和夫(科学ジャーナリスト)

大井 通博(おおい みちひろ)
環境省 地球環境局 総務課 研究調査室/気候変動適応室 室長

©JAXA

軌道上で観測中の「いぶき2号」のイメージCG。全球をメッシュに分けて、精密な温室効果ガスの観測を行う。雲などがあると観測が困難だった「いぶき」とは異なり、観測用のミラーを動かし雲を避けて観測行うことができる。

「いぶき2号」搭載の雲・エアロソルセンサ2型(TANSA-CAI-2)の初観測画像。インド北東部での野焼きにより発生したとみられる、温暖化の原因ともなる黒色炭素の浮遊を捉えている(点線で囲われた3カ所)。
上:可視光での観測データ。
下:紫外光での観測データ。赤い部分が黒色炭素の濃度が高い。

©JAXA

地球環境の未来のために、温室効果ガス排出削減を進める

── 最近頻発する異常な気象現象には地球温暖化が関係しているのではといわれています。

大井　人為的活動によって排出される二酸化炭素やメタンなど温室効果ガスの大気中濃度が上昇すると地球が温暖化し、それによってさまざまな気候変動がもたらされます。日本での最近の猛暑や豪雨も、そのような気候変動によるものではないかと、国民の皆さまも認識されていると思います。2018年10月に発表されたIPCC(気候変動に関する政府間パネル)の特別報告書では、2017年の世界平均気温は産業革命以前のレベルから1℃上昇していることが報告されています。

── 気候変動に対する世界的な取り組みは、今、どうなっていますか。

大井　気候変動問題に対処するために、2015年にパリ協定が合意されました。パリ協定は世界のすべての国が参加する枠組みで、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く抑えるという、いわゆる2℃目標を目指すことになりました。そのために、まず各国が温室効果ガスの排出をどのくらい減らすかという自分たちの目標を決め、それにもとづいて排出削減を進めます。ただし、各国が目標を決めただけでは、本当に世界全体として温室効果ガスの排出が減っているかどうかは分かりません。そこで5年に1度、世界全体での温室効果ガス排出削減の進捗状況を皆で評価し、その結果を各国が持ち帰って、自分たちの目標を見直すことになっています。

このパリ協定を実施するための細かいルールづくりはCOP(国連気候変動枠組条約締約国会議)で話し合われてきました。2016年、2017年と交渉が進み、2018年12月にポーランドで行われたCOP24でその実施ルールがまとまったところです。いよいよこれから世界全体がパリ協定に基づいて温室効果ガスの排出をしっかり減らしていくことになります。

「いぶき」の成果によって高まった衛星データの有用性

── 温室効果ガスの削減に関して「インベントリ」という言葉がよく出てきますね。

大井　インベントリは「目録」のことです。その国がどれぐらいの量の温室効果ガスを排出しているかという排出量の目録をインベントリとよんでいます。パリ協定では各国が排出削減の目標や進捗を報告するわけですが、そのための一番基礎となるデータがインベントリです。各国の取り組みがどれだけ進んでいるかを測るために非常に重要です。

──各国はインベントリをどのような方法で作成しているのでしょうか。

大井　どの燃料を燃やしたらどれくらい温室効果ガスが出るかはある程度分かっており、これを排出係数とよんでいます。燃料の種類ごとにその国が1年間にどれくらいの量を消費したかという統計データがあれば、そのデータに排出係数を掛け合わせて排出量を計算することができます。けれども、温室効果ガスの排出は多岐にわたりますので、いろいろな分野に目を光らせ、全体を足し合わせるという作業が必要になってきます。また、国によって統計データがどこまで整備されているかという問題もあります。

── 温室効果ガスの排出量を正確に知ることが必要になってくる。そこで、JAXAが2018年10月に打ち上げ、最近データ公開がはじまった「いぶき2号」(GOSAT-2)に期待されている役割があるわけですね。

大井　2009年に打ち上げられ、今も運用されている「いぶき」(GOSAT)によって地球大気全体の月別平均温室効果ガス濃度が季節変動しながら増加し続けている様子が明らかにされ、二酸化炭素の世界平均濃度が400ppmを超えたことが分かるという大きな成果が得られました。温室効果ガスの観測性能が向上した「いぶき2号」では、各国の排出量を推計することに使えるのではないかと期待されているわけです。まだ衛星による観測データを、統計などによる排出量計算の代替にするところまではいっていませんが、各国が報告する排出量をチェックするために使えるのではないかという検討がなされているところです。

「いぶき2号」のデータで、温室効果ガス排出データの評価を

── 排出量の推計やチェックに衛星データが有用であるというわけですね。

大井　実際、アメリカの研究者が自国のメタン排出量を、「いぶき」のデータを使って検討した論文を発表した例があります。宇宙から各国の排出量が測れるのであれば、それをぜひ使っていきたい。といいますのは、世界全体でどれだけ正確な統計データがとれているかという点には疑問が残るところもあるからです。「いぶき」と同じように、「いぶき2号」のデータも世界に公開されますから、各国は自分の数値がどのくらい正しいのかを、「いぶき2号」のデータを使って評価することができるのです。各国政府や環境NGOにとって、「いぶき2号」のデータはいろいろな使い道があるのではないでしょうか。また、メタンには家畜や自然起源の排出もあり、排出係数に誤差があったりして、必ずしも二酸化炭素と同じ精度のデータが得られているわけではないのです。メタンの排出量に関しては二酸化炭素以上に衛星データが有用なのではないかと、私は思っています。

── 今年5月には京都でIPCCの総会が開催されます。

大井　気候変動に関する科学的知見を集約し評価する役割を担うIPCCの49回総会が開催されます。IPCCは、今申し上げた排出係数などの科学的知見を集め、インベントリのガイドラインとしてまとめています。現在は2006年に作ったガイドラインがあるのですが、今度の京都の総会でこれを改良する議論がされることになっています。その中で、まさにインベントリ作成に衛星データが有用なのではないかということが科学的に議論される予定です。

その中で「いぶき」のデータを用いた先進的な研究の事例も紹介されればいいなと思っています。「いぶき」に続いて現在はアメリカと中国、ヨーロッパが温室効果ガスを観測する衛星を打ち上げており、今後も各国が打ち上げを計画しています。それだけに「いぶき」が果たした先進的な役割は非常に意義があり、世界で高い評価を得ています。日本が胸を張れる貢献といえます。

世界に気候変動の状況を伝えるJAXAの技術に期待

── JAXAに対して期待していること、あるいは要望などがありますでしょうか。

大井　「いぶき2号」については、まず「いぶき」に引き続き、世界全体の温室効果ガスはこんなに増えているという事実を世界に示し、各国の排出量を特定するというところまでぜひ踏み込んでいきたい。そのためには、衛星データと地上観測データとの結合とか、数値モデルと組み合わせるとか、いろいろ必要なことがあるわけですが、そのあたりは国立環境研究所に頑張ってもらいながら、日本の先進的なアプローチとして、世界に貢献していきたいと思います。また、衛星観測は継続が必要なので、ぜひ「いぶき2号」の後継機も検討していただきたいと思います。

── JAXAでは「しきさい」や「しずく」、「だいち2号」などの地球観測衛星も運用しています。これらの衛星データも気候変動問題に役立つでしょうか。

大井　昨年12月に気候変動適応法が施行されました。これからは温室効果ガスの排出削減だけでなく、気候変動に備え、影響を低減する「適応」の取り組みも必要です。JAXAの地球観測衛星は温暖化の影響予測や適応の対策を考える上で重要になってくると思います。私は研究調査室長として、これまでのお話をしてきましたが、気候変動適応室長も兼務しており、その立場からもJAXAの貢献に大いに期待しています。

──最後に大井さんご自身の抱負についてお話しください。

大井　パリ協定では各国が自ら掲げた目標を達成していくことになります。日本は2030年までに排出量を26%減らすことを目標にしています。まず、そこについてしっかりやっていかないといけないと思っています。さらにパリ協定が目指しているのは今世紀後半の温室効果ガス排出の実質ゼロ、まさに脱炭素社会ということになります。その道のりは決して容易ではありませんが、脱炭素社会の実現を目指して環境省としてしっかり取り組んでいきます。

2018年11月に国際宇宙ステーション（ISS）からサンプルを持ち帰った小型回収カプセルには、JAXAがこれまでに研究を続け、初めて実証できた技術が詰まっていました。
オールJAXA、オールジャパンで取り組んだHTV-Rの研究成果が活かされていることは、前号でお伝えしましたが、今回は、初飛行となった揚力誘導制御と新しく設計した断熱保冷容器について、開発チームに話を聞きました。

取材・文:大西 紀子

チームで挑む小型回収カプセル
～研究から開発へたすきをつなぐミッション～

日本初の揚力誘導制御と世界水準の軽量熱防護を実証

――小型回収カプセル開発の目的を教えてください。

宮崎　これまでアメリカやロシアに頼ってきた実験サンプルの回収を、日本が独自に回収する手段を獲得することが大きな目的の一つです。今回のミッションで、技術的に難しい揚力誘導制御と軽量の熱防護技術を獲得し、さらに新しく開発した真空二重断熱保冷容器により宇宙実験サンプルを一定の温度に保ちながら回収することに成功しました。

JAXAはすでに幅広い分野ですぐれた宇宙技術を獲得していますが、宇宙からの帰還技術に関しては技術獲得が遅れていました。今回の小型回収カプセル開発には、この領域の技術を得るという目的もありました。

はじまりは問い合わせフォーム

――断熱保冷容器を魔法瓶タイプにしようと思ったきっかけを教えてください。

畠中　ISSから分離され、回収されるまでの3～4日間、4℃±2℃という厳しい保冷条件を満たす容器を作る必要がありました。プロジェクトの初期では、実は魔法瓶構造ではないものの検討が進められていました。平面状の真空断熱材を折り曲げ容器状に組んで断熱する設計でした。しかし、丸い容器の中に多角形の断熱容器を入れるとスペースの無駄が大きいし、断熱材の隙間から熱が逃げやすい。そこで魔法瓶を使えないかなと思い、複数の会社に「問い合わせフォーム」から問い合わせました。

――宇宙用の魔法瓶を突然依頼されたら驚いたのでは？

畠中　はい。今回ご協力いただいたタイガー魔法瓶の方もびっくりされたようです（笑）。その後、電話や対面でいろいろと相談し、筒状の二つの魔法瓶を重ねることで、「いけそうだ」という見込みを得たのですが、既に当初案で設計が走り出しており一旦はお蔵入りになりました。

――実際に動き出したのはいつ頃ですか。

宮崎　1年半後の2015年の11月です。折り曲げ方式で性能が足りない場合に備えバックアップ案として魔法瓶タイプも検討は進めておこうと。協力を得るため会社を訪問し、ミッションの意義を一生懸命説明しました。

畠中　後発の検討着手となりスケジュールがかなりタイトでしたが、「うちがやる」と引き受けていただいたのです。

宮崎　解析に強いテクノソルバ社の協力も得て約3カ月で設計を進め、年度末までに試作品を納品していただくことができました。ただ、二つのうち内側の容器で断熱性能が出ないという問題が出てしまいました。

なかむら　りょう
中村　涼
有人宇宙技術部門
HTV技術センター
主任研究開発員

はるき　みすず
春木 美鈴
研究開発部門
第一研究ユニット
研究開発員

みやざき　かずひろ
宮崎 和宏
有人宇宙技術部門
HTV技術センター
主任研究開発員

はたけなか　りゅうた
畠中 龍太
研究開発部門
第二研究ユニット
研究開発員

生命維持技術
与圧環境制御
構造（大型与圧、大型非与圧、デブリ防護）
電力
システム維持機能技術
通信（広帯域、リアルタイム、音声、映像）
熱制御（能動、受動）
航法・誘導制御、姿勢制御
無人補給技術
ランデブ・ドッキング
軌道変換・推進
誘導揚力飛行、緩降下、最終降着、帰還時推進（低毒推進系）
有人宇宙船技術（帰還技術）
再突入熱防護、帰還時排熱
帰還時回収
実時間運用管制
有人運用技術
訓練・認定
搭乗員選抜・訓練
搭乗員関連技術
健康管理技術・医学
安全要求・評価
安全評価・管理技術
HTV以前（JEM, ETS-VII, USERS等）
HTV

カプセル開発により得られる技術領域（赤の破線部分）

お盆休み前日の性能確認試験

――どのように解決されたのですか。

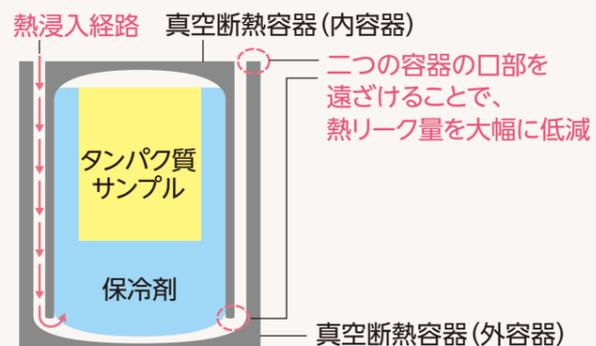
宮崎　春からさまざまなトラブルシュートを続け原因を絞り込んでいき、考えられる要因に手を打った内側容器の再試作品ができたのが2016年の夏。ここで断熱性能が出ないとカプセルの開発に間に合わなくなり魔法瓶タイプは諦めるしかないというぎりぎりのタイミングでした。会社側がお盆休みに入る前日の朝でしたが、二つの容器を組み合わせた初めての保冷性能確認試験に臨むため畠中さんと大阪に向かいました。しかし、到着すると断熱性能がうまく出ておらず、会社側は条件を変えて容器の真空引きを再トライしてくれていました。祈るような気持ちで待ち時間がとても長く感じましたが、「性能が出ました！」という報告が飛び込んできました。すぐに保冷剤を入れて保冷性能を確認する実験を始め、6日後、お盆休み明けに結果を確認したら、温度が保たれていることが分かり、苦労の末、ようやく魔法瓶タイプでいけるという見通しが得られたのです。

――本当にぎりぎりのタイミングだったのですね。今回の開発で難しかった点はどこですか。

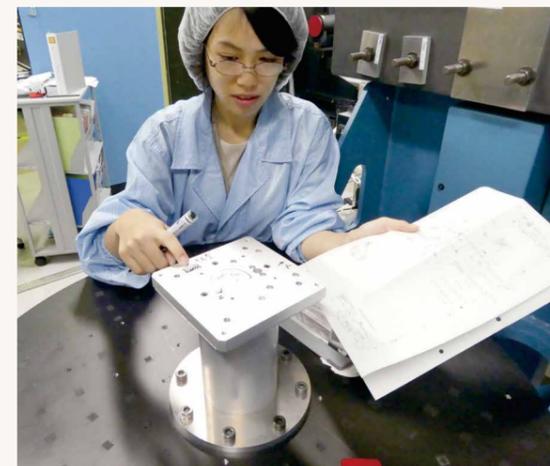
宮崎　厚さ、重さ、頑丈さ、保冷性能、搭載容量。これらを同時に満足させる設計にすることが難しかったですね。最適化のため何回も設計をやり直し強度試験も行いました。着水時にかかる40Gの衝撃で容器が壊れるとサンプルが温まってしまう。一方、壊れないように板厚を厚くすると重くなります。

畠中　また、板厚が厚くなると熱が余計に逃げます。2倍厚ければそこを伝わって2倍熱が逃げる。そこで、着水で力が加わる部分だけ厚めにし、他は薄くする工夫をしました。

宮崎　そして、最終的に保冷性能が優れた魔法瓶タイプが採用されました。カプセル回収後冷えたままのサンプルを研究者に引き渡しできた時は本当にうれしかったです。

熱浸入経路
真空断熱容器（内容器）
二つの容器の口部を遠ざけることで、熱リーク量を大幅に低減
タンパク質サンプル
保冷剤
真空断熱容器（外容器）

二重魔法瓶方式の内部構造

宇宙から帰還したカプセルの一部と真空二重断熱保冷容器（左:外容器　右:内容器）。

ISSでのカプセル最終組み立て作業時の管制室の様子。

三軸モーションテーブルを用いた誘導制御試験の様子。

技術のたすきをつなぐ小型回収カプセル

――カプセルの揚力誘導制御にはHTV-R（回収機能付加型宇宙ステーション補給機）の研究成果（JAXA's075号を参照）が引き継がれているとうかがいました。

中村　HTV-Rの研究をベースにした揚力誘導のロジックは2014年には既にシミュレーションベースで検証されていました。このロジックを小型回収カプセルの搭載ソフトウェアに実装し、実際にカプセルを意図通りに飛行させるにはどうすれば良いか、というのがわれわれの課題でした。

――揚力誘導制御はどんな仕組みなのでしょうか。

春木　ISSから分離した「こうのとり」7号機から小型回収カプセルが放出されます。その後、カプセルに空気の力がかかり始めると抗力と一緒に小さい揚力が発生します。この揚力方向を姿勢の傾きで制御することで、自分の進む方向や飛行距離をコントロールして、目標点に向けて誘導します。この姿勢で飛ぶとどのくらい飛びますよというのを計算し、その情報を使って姿勢角を変えていくのです。

誤差を抑えて自律的に飛行する

――揚力誘導制御に要求されたことは何ですか？

春木　二つありました。一つは自分で計算して自律的に飛行することです。カプセルは打ち上げ後、外部からアクセスできないため、目標点の設定、揚力誘導の開始、パラシュート開傘のタイミングなど、すべてカプセル自身が計算し飛行することが求められました。もう一つは「こうのとり」から分離されたときに大きな姿勢誤差があっても、目標点に到達することです。普通はスタートラッカーなどを使って正確な姿勢角を計算してから大気圏に再突入するのですが、今回の小型回収カプセルにはそのような精度の高いセンサを積んでいませんでした。

――HTV-Rと今回の小型カプセルで違っていたのは何ですか。

春木　大きさ、重さが違うため、重心に対する感度も違ってきます。小型カプセルでは中心にわずか1㎜の誤差があっても、カプセルの揚力が変わってくるのです。他にもセンサの精度など、研究段階の想定と違う部分がかなりありました。

――カプセルにソフトウェアを搭載するうえで、大変だった点は何ですか。

春木　一発勝負の飛行に対し、ソフトウェアとハードウェアが確実に動くことをどうやって評価するかという点が一番難しかったです。JAXAの三軸モーションテーブルという装置を使った試験では、カプセルの実際の動きからジャイロセンサとソフトウェアが「位置・姿勢」を計算し、コマンドを出せるかを確認しました。また飛行シミュレータを構築し、さまざまな誤差があった場合もきちんと飛行することをシミュレーションにより確認しました。

中村　飛行シミュレータの構築とそれによる評価をカプセルの開発と並行して進めなければいけないという事情がありました。シミュレーション結果にもとづき誘導制御系からハードウェア側へ要求を出せればよかったのですが、例えば推進系の推力については概念設計時に設定した推力要求をベースに開発が進んでいたため、変更できない前提条件として、シミュレーションの結果を判断しながら誘導制御手法を検討するという感じでした。

次に何をすればよいのかが分かった

――目標点への誘導が成功しました。この成果は次のカプセルを開発するときにどのように活かせそうですか。

春木　「飛行実証した」という実績はとても大きく、次への課題も見えてきました。研究して、実証すると、またそこから課題が出てきます。研究と開発のサイクルが人と一緒に回っていくと今後につながると思います。このプロジェクトに関われて本当に幸せでした。

中村　研究段階から実証に至る過程で何をすればよいかという勘所がつきました。同じカプセルを同じように飛ばせといわれれば、かなり省ける部分はあると思っています。実際に飛ばすことで、もう少しこんなふうに飛ばしたいという気づきがあったことも今回の成果といえます。一方、大型化するためにはどうかという話になると、いろいろ追加していかなくてはいけないものが出てきます。なかなか簡単にはいかないと思いますが、設計・製造・試験・運用の一連の経験が得られたので、「次に飛ばすときには、こういうことをしなければいけない」ということが分かる人間がJAXAの中に増えたといえる開発ができたのではないかと思っています。

小型回収カプセルのフライトシーケンス
©JAXA

カプセルが完成しHTVに搭載するため種子島に輸送する前の記念写真。

福井県の高校生たちが開発

宇宙日本食「サバ醤油味付け缶詰」がJAXAの認証を得るまでの12年

取材・文：山根 一眞（ノンフィクション作家）

宇宙日本食「サバ醤油味付け缶詰」

2013年から美容・健康によいとサバ缶はツナ缶をしのぐ販売数トップとなり品不足のスーパーも出る大ブームがつづいているが、宇宙での実証後に発売されれば、この「宇宙食サバ缶」が大人気になるだろう。（写真・山根一眞）

福井県立若狭高等学校（小浜市）海洋科学科の生徒たちが開発した「サバ醤油味付け缶詰」が、33品目の宇宙日本食として認証された。2018年11月12日、JAXA理事の若田光一宇宙飛行士が同校を訪れ認証式を行い、小浜市は大いにわいた。

日本海の若狭湾に面する小浜市と京都を結ぶ道は古くから「鯖街道」と呼ばれてきた。その小浜市で、国際宇宙ステーションの日本人宇宙飛行士用の宇宙食が誕生した。

その宇宙食サバ缶、実に旨い！　こんなおいしいサバ缶は初めてだった。若田さんや金井宣茂宇宙飛行士も絶賛していたが、お世辞ではなかった。

もっとも開発には12年かかった。生徒たちの指導者は海洋科学科教諭の小坂康之さん（41歳）。東京海洋大学出身で、福井県の特産品「へしこ」（サバのぬか漬け）の研究で新発見をした食品化学者だ。小坂さんは小浜水産高等学校（2013年に若狭高校と統合）時代の2006年、サバ缶の生産のため食品衛生管理の国際規格、HACCP（ハサップ）を取得した。大学時代、短期留学したノールウェイでは水産製品のHACCP取得が常識だと知ったからだった。後、生徒の一人が、HACCPがもとは米国で宇宙食の安全性確保のため開発された規格と知り「宇宙食に採用されるサバ缶を作ろう」と発案。JAXA宇宙教育センターの指導を受け研究開発が開始。生徒たちは試行錯誤を繰り返し、試験データを後輩にバトンタッチし続けてきた。天然ものと養殖もの、それぞれの鮮度や加工時間による味の違い、缶詰としての風味期限など工業化を前提に膨大なレシピを数値化して蓄積してきたのだ。そして12年目に完成したのが、宇宙では味が薄く感じることをふまえ少し濃いめの味で砂糖が多めの醤油味のサバ缶なのである。無重力状態で中身が飛散しないよう、粘度を高めるため葛を混ぜる工夫も行った。ちなみに葛は鯖街道の熊川宿が日本三大産地。生徒たちは地域産業の振興も念頭において開発を続け、高校生による宇宙食が完成したのである。

その研究開発作業は「課題研究の日」（毎週木曜日、午前8時半〜12時15分）が当てられた。小坂先生は、生徒の自主性を育てようという若狭高校のこの先進的なカリキュラムがあったからこそ、「サバ醤油味付け缶詰」は誕生したと語っていた。

12年目のバトンタッチを受け宇宙食サバ缶をゴールさせた高校生たちと指導教諭の小坂康之さん（後列中央）。若狭高等学校で。（写真・山根一眞）

若狭高校で宇宙食サバ缶製造の説明を受ける若田理事（中央）。（写真提供：福井県立若狭高等学校）

[航空機電動化(ECLAIR)コンソーシアム]
産官学の異分野連携で
航空機の電動化を目指す

西沢(にしざわ) 啓(あきら)
航空技術部門
次世代航空イノベーションハブ
ハブマネージャ
(エミッションフリー航空機技術チーム長)

2018年7月に発足した「航空機電動化(ECLAIR)コンソーシアム」は、JAXAの航空技術部門を中核に産学官連携で、CO_2排出などの環境負荷を抜本的に低減する航空機の電動化技術を開発するとともに、日本の航空産業の拡大を目的とした取り組みです。西沢啓エミッションフリー航空機技術チーム長に、航空機の電動化の実現に向けて我が国としてどのような将来展望を描いているのか、具体的にはどのような活動に取り組んでいくのかについて話を聞きました。

取材・文:田中 令以知

航空産業に縁の薄かった企業も参加 異分野連携で技術課題を克服する

——航空機電動化(ECLAIR)コンソーシアムの概要について教えてください。

西沢　2017年ぐらいから、国際的に航空機電動化に対するさまざまなプロジェクトが立ち上がって、航空機の排出するCO_2量を長期的には削減しないといけない、その技術的な解として電動化やバイオ燃料のような新しい技術の貢献が必要である、という認識が広く共有されるようになってきました。航空機を電動化する場合、数人乗りの小型機であれば、電池とモーターでファンを駆動する方式をとれますが、もう少し規模の大きいリージョナルなど旅客機のクラスになると、航続距離が長くなり、それに適応できる電池の技術がないので、航空機に搭載したガスタービンエンジンで発電し、その電気でファンをまわす「ハイブリッド方式」が必要になります。

日本は、航空機の電動化に必要な要素技術には強みがあるものの、その技術はこれまで航空業界とはあまり縁がなかった業界が持っています。そこで、異分野連携に取り組むコンソーシアムが必要だと考え、経済産業省やメーカーに広く声を掛けて、2018年7月に航空機電動化(ECLAIR)コンソーシアムを立ち上げました。

このコンソーシアムでは、航空機電動化にとって非常に重要な技術課題の解決につながるキー技術を、オープンイノベーションのような新しい取り組みでつくっていきます。

——第3期中期計画で取り組んだ「航空機用電動推進システムの飛行実証(FEATHER)」で得られた知見は、電動航空機の開発にどのような方向性を導いたのでしょうか?

西沢　「FEATHER」は有人飛行実証を達成して、国際的なプレゼンスが相当高くなったことが挙げられます。ある技術を社会実装するには、高いパフォーマンスを発揮する技術とそれが安全であるかどうかを証明する技術を両方同時に持っている必要があります。研究者は前者の追求に偏りがちですが、飛行実証を行い、安全を証明することも非常に重要であることを「FEATHER」での教訓として得ました。

航空機電動化の技術的な課題としては「発熱」「電気ノイズ」「高高度環境への適応」が挙げられます。まず「発熱」ですが、航空機を電動化した場合、空気中にダイレクトに熱を捨てる方法がない一方で、モーターもインバーターもバッテリーもずっと発熱しています。この発熱をどうマネジメントするのか、新材料の開発も含めて鍵になってくると思います。

また、「電気ノイズ」については、電動モーターのように大出力で周波数の高いものを搭載すると、信号系統や通信系統にノイズが干渉します。実機で飛行実証する段階で対処していくことにならざるを得ない面もありますが、それを事前に予想してノイズを抑える技術が必要になってくると思います。

さらに「高高度環境への適応」ですが、旅客機は1万メートル以上の上空を飛行するので、低圧環境・高放射線環境に適応できるようなモーターやインバーターを作る必要があります。これは航空特有の課題として異分野連携を通じて重点的な取り組みになると思います。

航空機電動化における重要技術課題の抽出

分類	重要技術課題名(概要)	構成要素/システム
A) 全高度共通の重要技術課題	**高出力密度化** (重量の成立性確保、最大出力運転時間確保のための耐熱・冷却・放熱性)	電動要素(電動モータ、発電機、パワーエレクトロニクス、電池、遮断器、分配器、送配電線等)
	電池の安全性と高エネルギ密度化の両立 (熱暴走等の危険封じ込めと電池システム全体としての高エネルギ密度化の両立)	電池(電力ストレージ)
	高効率化 (BLIや多発化による推進効率の向上、推進系熱効率の向上)	推進系機体統合システム、ハイブリッドシステム、電動要素
	安全性・信頼性保証 (電動要素追加による故障率増加等に対するシステムの安全性と信頼性の保証)	電動推進システム、ハイブリッドシステム、電動要素
B) 高高度環境特有の重要技術課題	**耐放電・耐放射線** (高高度環境における高電圧要素及びシステムの放電及び放射線影響への対処	パワーエレクトロニクス、電動モータ、発電機、電動要素
	熱&パワー管理・制御 (低空気密度・ガスタービンエンジン内外高温環境下の熱とパワーマネジメント)	電動要素、電動推進システム、ハイブリッドシステム
C) 低高度運用特有の重要技術課題	**耐故障** (推進系故障時の緊急着陸または運航継続に対する耐故障や故障許容設計)	電動推進システム
	低騒音化 (ファン、プロペラの空力騒音低減)	ファン、プロペラ

出典:JAXA航空技術部門ウェブサイト、特集「電動航空機」第4回「電動化を実現する技術」より
(http://www.aero.jaxa.jp/spsite/eclair-sp/electrification_tech.html)

高効率発電機を電力源としたハイブリッド推進システムによるエミッションフリー・エアクラフトのイメージCG。
©JAXA

全固体電池やモーターなど 日本の先進技術を航空機に活かす

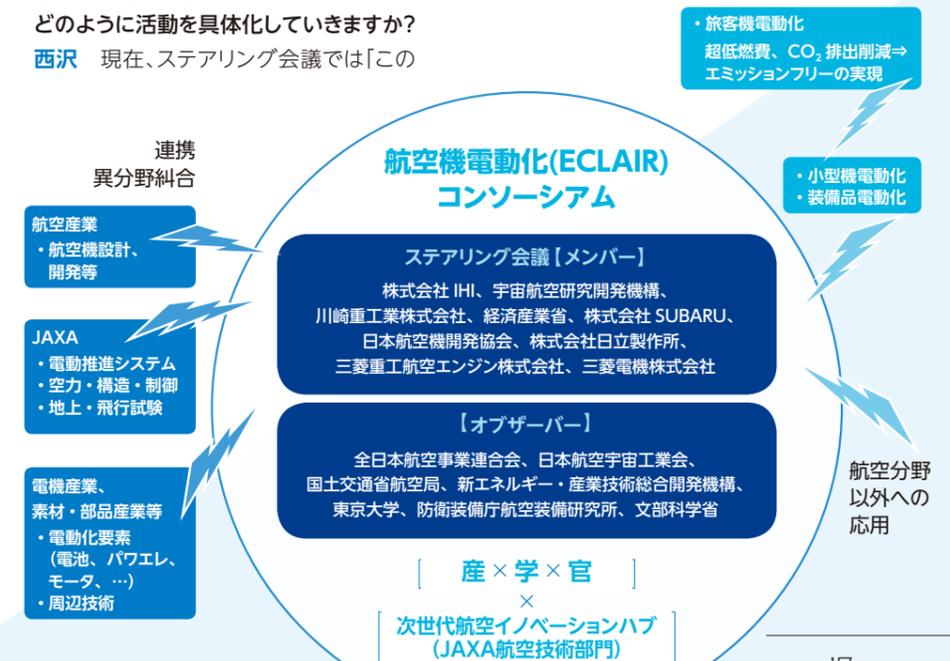
——「FEATHER」から「ECLAIR」へ移っていく中で、航空機の電動化に必要な技術が日本の中で発展してきていますか?

西沢　全固体電池のような電池におけるイノベーションは、航空分野にとっては非常に魅力的ですね。「FEATHER」の時に使っていたリチウムイオン電池では発火のリスクがあって、パフォーマンスと安全性を両立させるためにどこで線を引くのかが難しかったのです。

現在、航空機で使われているリチウムイオン電池ではガスや煙の発生に備えて非常に頑丈な箱の中に電池を収めていますが、それを推進系の電池でやってしまうと重くなってしまい、燃費に大きく影響するので、燃えない電池が出てきたというのは、大きいですね。ただ、全固体電池が航空機のような大出力、大容量、高電圧のものに適応できるレベルにはなっていないのが現状です。これは、自動車業界でも必要な技術なので、自動車で進歩した技術を、航空に適用できるか検討することになると思います。

もう一つは、非常に出力密度の高いモーターが出てきたということがあります。「FEATHER」をやっている頃の出力密度は1kg当たり2kW程度の出力だったんですが、今はもう5kWまで出るようになっており、モーターの技術革新が相当に進んでいます。このモーターの技術は日本が先行しているので、ここに強みをもつ企業や研究機関と組むことができれば、大きな進歩になるかなと思います。

共同研究の枠組みを作り 電動要素技術と航空技術を糾合

——2018年12月に開催されたECLAIRの第1回オープンフォーラムでは、日本の電動要素技術と航空技術の糾合について参加者からの高い関心がうかがえました。今後どのように活動を具体化していきますか?

西沢　現在、ステアリング会議では「この時期にこの社会実装をするためには、この技術目標を達成すべき」というロードマップを設定した段階です。誰が具体的にそれを担当するのかという話にはまだ至っていません。メンバー間の情報共有や話し合いによる合意の下、共同研究など活動の枠組を作っていくというやり方を取っていくことになると思います。

このコンソーシアムは、近い将来、メンバー企業が業界をリードしていってくれることを期待しつつ、現在はJAXAが音頭をとって立ち上げていますので、最初に声を掛けるのはJAXAの役割になってくると思います。その上で、個別のサブシステムの技術に関しては非常に強い企業に分科会的にリーダーシップをお願いするやり方になるのかな、と想像しています。

——ECLAIRコンソーシアムの参加に関心のある産業界に向けてメッセージを。

西沢　航空機の電動化は全く新しい取り組みになります。そこには、電動デバイスの技術を持っている電気機器メーカーはもちろん、素材メーカーの協力が不可欠です。これらの分野で強みを持つ企業や研究機関に参加していただき、連携して開発に取り組むことで、大きな技術的な成果につなげていきたいと思います。

コンソーシアムの枠組み

再使用型宇宙輸送システムの研究［小型実験機RV-Xと 1段再使用飛行実験（CALLISTO）］

野中 聡（のなか さとし）
宇宙科学研究所
宇宙飛翔工学研究系
准教授

紙田 徹（かみた とおる）
研究開発部門
第四研究ユニット
研究領域主幹
主幹研究開発員

石本 真二（いしもと しんじ）
研究開発部門
1段再使用飛行実験
（CALLISTO）
プリプロジェクトチーム
チーム長

齊藤 靖博（さいとう やすひろ）
研究開発部門
1段再使用飛行実験
（CALLISTO）
プリプロジェクトチーム
副チーム長

再使用ロケットが切り拓く宇宙利用拡大

一機のロケットが飛行機のようにくり返し離着陸して宇宙と地球を往復する――。そんなSFアニメの世界のような技術の研究開発が日本でも進んでいます。打ち上げコストの大幅な低減が見込める、JAXAの新しい「再使用型宇宙輸送システム」の研究開発について、研究メンバーに聞きました。

取材・文：山村 紳一郎（サイエンスライター）

再使用には従来と異なる技術が必要

――再使用型宇宙輸送システムとは、どんな技術で、難しさはどこにあるでしょう？

石本　簡単にいうと、現在は1回限りで運用しているロケットの大部分を、くり返し使用する技術です。つまり打ち上げるだけではなく、ロケット本体（現在の計画では1段目）を帰還させる。このためには着陸装置はもちろん、ピンポイントに着陸させる自動制御や、機体が回転していても確実にロケット燃料をエンジンに送るための推進薬制御、エンジンの再整備など打ち上げを効率的に行うための運用などの面で、従来型ロケットとは大きく異なる技術が求められます。

紙田　現在のロケットは1回の使用だけを考えて設計されています。補修のしやすさや反復使用に対する部品耐久性などよりも、ロケットとしての基本性能が重視されます。再使用を前提とした設計を一から作り上げる必要があるのです。

野中　例えばエンジンなども、100回飛ばすなら何回目でどのような点検を行い、どの部品を交換するかというような、自動車や飛行機などと同様の整備にかかる知見も必要です。整備のためには分解・組み立てのしやすさなどがとても重要で、寿命を管理した上で、運用するための考え方や見方が設計の段階から求められます。

JAXA宇宙科学研究所では、1990年代後半から全長3.5mのRV-Tという小型実験機で再使用の研究を行ってきました。また、再使用型の観測ロケットを提案し、その開発に向けた研究を進めました。それらの研究の成果を活かして2016年の夏から、小型実験機RV-Xによる実証に向けた準備を進めてきました。

石本　ロケット再使用化の狙いは確かにコスト低減なのですが、実際の効果はまだはっきりしていません。そこで技術開発を進めながら運用上の課題とコスト低減効果を見きわめるのが、この研究の主眼です。私たちの計画では、技術開発と設計手法の確立を実験機RV-Xで、実運用機に近い飛行実験をCALLISTOでという2段階で検証・評価を進めていきます。CALLISTO は、CNES（フランス国立宇宙研究センター）と、DLR（ドイツ航空宇宙センター）との国際協力で行います。

運用技術の高度化で勝負

――その中での一つのステップが、昨年9月から10月に行われたRV-Xの燃焼試験ですね。エンジンを含め、JAXAの再使用技術のポイント、強みはどこにあるのでしょうか？

野中　目指しているのは現在のように年に数機ではなく、1日に何機も打ち上げられる…飛行機のようにロケットを活用できるレベルの再使用です。これは従来の1回使用と大きな違いがあります。今回の実験では1日おきに試験を行いましたが、作業手順の確立と効率化にさまざまな工夫が必要でした。最終的には24時間ごとの打ち上げを考えていますので、それに向けての運用技術高度化を地上燃焼試験で検証したかたちです。

紙田　今まではエンジン組み立てなどにクリーンルームが必須でしたが、今回は実験場でスタンドに組んだ機体にエンジンを取りつけた状態で分解点検を行いました。ロバスト（堅牢）性向上について、経験値と知見が得られたと思います。

野中　1回使用ロケットで高性能を追求すると反復使用性能は落ちます。そこで性能を必要十分レベルに抑えて100回使えるものを作る…そんなバランス感覚というか、さじ加減がポイントです。また、何か故障しても帰ってこられるような仕組みも作っておくような、これまでのロケットの世界ではあまり考えなかった目配り、気配りが再使用ロケットでは求められますね。

2018年9月1日〜10月5日にJAXA能代ロケット実験場において実施されたRV-Xの第1次地上燃焼試験。

現在の空港のように、再使用ロケットが発着する未来の発射場のイメージCG

紙田　JAXAは使い切りロケットでは世界最高レベルの実績がありますから、耐久性を上げるだけなら設計に余裕を持たせることで可能なのです。しかし、過剰な余裕を見込むと必要以上に重くなり、性能が落ちてしまう。必要な能力を発揮しつつ再使用への最適化を目指すという、かなり難しい課題です。基本的なところをRV-Xで、さらにより厳しい部分をCALLISTOで…というように着実に進め、運用全体を含めたシステム全体での最適解を見いだして優位性を発揮したいですね。

石本　日本が強い要素技術はさまざまありますが、いま伸ばしたいのは地上の運用ノウハウです。運用技術はJAXAの優位性で、勝負のポイントと考えています。またJAXAが持つ高度な数値シミュレーション技術も大きな強みです。例えば再使用ロケットでは帰還のために大きな姿勢変化が必要で、このときにタンク内で液体燃料が暴れやすい。これを防ぐために、シミュレーション結果を基にタンク内部の構造を設計しています。シミュレーションと実験の両輪で技術を高度化し、先行企業に追いつき追い越すことを考えています。

誰もが宇宙を行き来できる世界を

――今後の展開について、少し先の夢を含めてお話しいただければと思います。

紙田　まず、2019年度内に2回目の地上燃焼試験を行い、RV-Xの高度約100mの飛行試験を行ってデータを取得します。

齊藤　設計上の課題をRV-Xで検証し、その成果をCALLISTOに適用して必要な技術を揃えるという展望です。再使用というのは安く宇宙に行く選択肢の一つですが、それがベストなのかはまだ分かりません。ただ、大きな可能性を持つことは確かですから追い求めていきたいですね。

石本　その先には、1段目だけでなくロケット全体の再使用を検討する段階が、いずれは来ると思います。もちろん将来の課題としてですが。

齊藤　再使用型輸送システムは、将来の有人惑星探査実現においてもキー技術になるでしょう。輸送コストはミッションの成立性を左右する一つの大きな課題で、その基礎をCALLISTOで培うことで可能性が高まると思います。有人探査だけでなく、輸送コスト低減で敷居を下げ宇宙利用が拡大する未来をCALLISTOにより喚起したいと考えています。

石本　ISSなどで宇宙に人間の生存環境を作れるイメージができたと思いますが、さらに、宇宙を生活圏にしたいと夢見ています。私はSFアニメ『機動戦士ガンダム』の世代なのですが、この中に登場するスペースコロニーのような世界を作りたい。そのために宇宙輸送の可能性を高めていくのは、技術者としてのやりがいもあります。

野中　100年前は夢だった飛行機の普及と同じように、人々が空港のような場所から再使用ロケットで飛び立ち、地上と宇宙を誰もが気軽に行き来できる世界を実現したいですね。また、この技術が宇宙以外の分野にも役立つ可能性もあります。RV-Xでは燃料に水素を使っており、その安全で効率的な利用技術を培っています。そのノウハウは、世界中で期待が高まる水素社会実現のための技術基盤づくりに寄与できると思います。

RV-XとCALLISTO

実験フェーズ1
RV-X

飛行実験
JAXA 単独の研究として、能代ロケット実験場で実施予定。

目的
着陸段階での誘導制御技術実証などを行う。

実証技術
・着陸段階の基礎データ取得
・再使用エンジンのデータ取得

アビオニクス
LOXタンク
GHeタンク
LH2タンク
エンジン
着陸脚

実験フェーズ2
CALLISTO

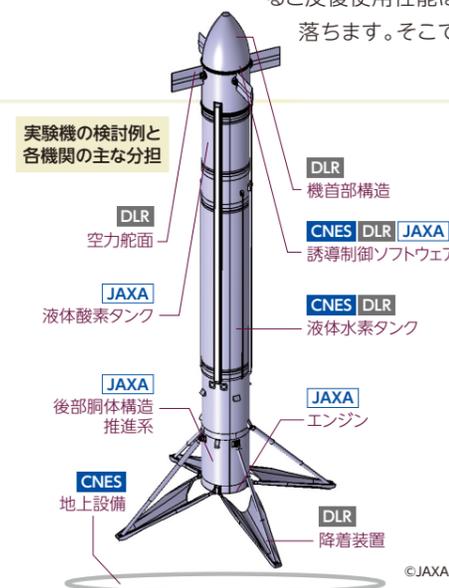
飛行実験
・ギアナ宇宙センター（仏領）で実施
・仏CNES、独DLRとの3機関共同で実施し早期かつ確実な技術獲得を図る。

目的
1段再使用化に向けた早期かつ確実な技術獲得および経済性に関するデータ蓄積を行う。

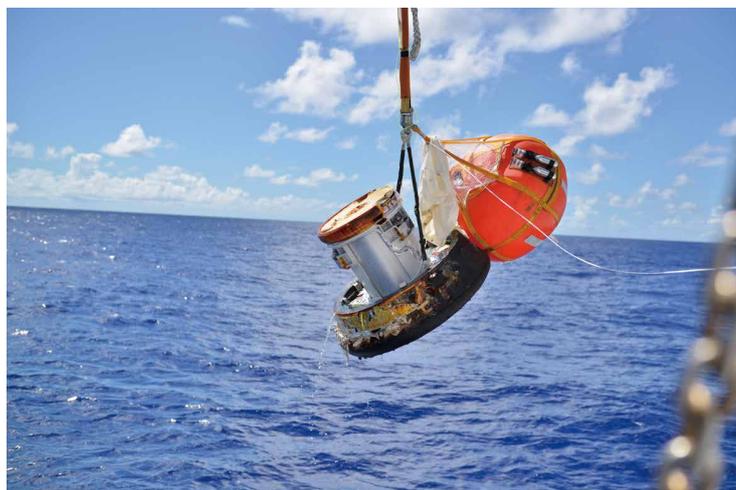
実証技術
打ち上げから着陸までの一連の飛行を通じて、誘導制御技術・推進薬マネジメントを実証。

実験機の検討例と各機関の主な分担

DLR　機首部構造
DLR　空力舵面
CNES　DLR　JAXA　誘導制御ソフトウェア
JAXA　液体酸素タンク
CNES　DLR　液体水素タンク
JAXA　後部胴体構造 推進系
JAXA　エンジン
CNES　地上設備
DLR　降着装置

JAXA TOPICS
JAXAトピックス

TOPIC 1 「HTV搭載小型回収カプセルの開発」が日本産業技術大賞文部科学大臣賞受賞

第48回(2019年)日本産業技術大賞において、「HTV搭載小型回収カプセルの開発」が文部科学大臣賞を受賞しました。この賞は、その年に実用化された革新的な大型産業設備・構造物や、先端技術の開発、実用化で顕著な成果をあげた企業・グループを表彰し、産業界や社会の発展に貢献した成果をたたえ、技術開発を奨励するものです。

受賞業績:「HTV搭載小型回収カプセルの開発」
JAXA、株式会社エイ・イー・エス、三菱重工業株式会社、川崎重工業株式会社、藤倉航装株式会社、明星電気株式会社、株式会社テクノソルバ、タイガー魔法瓶株式会社、三菱スペース・ソフトウェア株式会社の計9社による合同受賞。

2018年11月11日。小笠原諸島南鳥島沖にて回収船に引き上げられるHTV搭載小型回収カプセル。

TOPIC 2 イプシロンロケット4号機による革新的衛星技術実証1号機の打ち上げ成功!

2019年1月18日、内之浦宇宙空間観測所から革新的衛星技術実証1号機を搭載したイプシロンロケット4号機が打ち上げられました。革新的衛星技術実証1号機は、JAXAがベンチャー企業の力を利用して開発した200kg級小型衛星である小型実証衛星1号機(RAPIS-1)、60kg級の超小型衛星3基(MicroDragon、RISESAT、ALE-1)、10cm×10cm×10cmを基本ユニットとするキューブサット3基(OrigamiSat-1、Aoba VELOX-IV、NEXUS)の計7基で構成されていました。

ロケットは計画どおり飛行し、打ち上げから約51分55秒後に小型実証衛星1号機を正常に分離したことを確認しました。また、MicroDragon、RISESAT、ALE-1、OrigamiSat-1、Aoba VELOX-IV及びNEXUSの6基もすべて正常に分離したことを確認しました。

イプシロンロケットは2013年に初号機が打ち上げられ、2号機からは打ち上げ能力の向上や搭載可能な衛星サイズの拡大を目的とした改良開発(強化型開発)が行われました。3号機では、3段モータの上に小型の液体推進システムを搭載しました。これによって固体ロケットでは難しい精度の高い軌道投入が可能となりました。3号機はイプシロンロケットとして初めて太陽同期準回帰軌道への高い精度での軌道投入を行いました。また、衛星を分離する機構に改良を加えて、ロケットから分離されるときの衝撃を低く抑えています。

今回の4号機は、3号機をベースに複数衛星の同時打ち上げを行うシステムを搭載し、衛星ごとに設定された異なる軌道へ、それぞれ最適なタイミングで軌道投入することに成功しました。

国立研究開発法人
宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

広報部 〒101-8008 東京都千代田区神田駿河台4-6 御茶ノ水ソラシティ | TEL:03-5289-3650 | FAX:03-3258-5051

JAXAウェブサイト http://www.jaxa.jp/
メールサービス http://fanfun.jaxa.jp/media/mail/